中国生态农业学报 2017年5月 第25卷 第5期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, May 2017, 25(5): 677−688

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170222

张嘉莉, 朱从桦, 豆攀, 马晓君, 王兴龙, 孔凡磊, 袁继超. 硅、磷配施对玉米苗期生长及氮磷钾积累的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 677−688

Zhang J L, Zhu C H, Dou P, Ma X J, Wang X L, Kong F L, Yuan J C. Effect of phosphorus and silicon application on the uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium by maize seedlings[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(5): 677−688

硅、磷配施对玉米苗期生长及氮磷钾积累的影响*

张嘉莉[1,2], 朱从桦[1,2], 豆 攀[1], 马晓君[1], 王兴龙[1], 孔凡磊[1,2], 袁继超[1,2]**

(1. 四川农业大学农学院 成都 611130; 2. 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室 成都 611130)

摘 要: 以'正红2号'和'正红115'玉米为材料, 采用砂培方式, 设置3个纯磷水平[1.0 mmol·L^{-1}(正常磷水平, $P_{1.0}$)、0.1 mmol·L^{-1}(中度缺磷, $P_{0.1}$)和0.01 mmol·L^{-1}(重度缺磷, $P_{0.01}$)]和3个纯硅水平[1.5 mmol·L^{-1}($Si_{1.5}$)、0.75 mmol·L^{-1}($Si_{0.75}$)和0 mmol·L^{-1}(Si_0)], 通过对玉米苗期干物质、叶面积、根系形态和氮磷钾含量的测定分析, 研究硅、磷配施对玉米苗期根系生长、各器官干物质及氮、磷和钾养分积累与利用的影响, 为磷、硅肥合理配施提供理论依据。结果表明: 缺磷抑制玉米苗期生长, 降低根长、根体积、根表面积和叶面积, 减少磷和氮、钾的吸收以及干物质积累量, 这种效应随磷浓度的降低而增强; 玉米通过提高根冠比, 增加磷、氮在根系中的分配率, 提高氮、磷、钾的干物质生产效率来适应低磷环境; 低磷胁迫对'正红115'根系生长和磷吸收积累量的影响大于'正红2号', 但'正红115'在低磷条件下大幅度提高磷在根系中的分配率。在正常磷($P_{1.0}$)条件下加硅可促进玉米根系生长, 增加磷和氮、钾积累量, 提高其在地上部分配率, 增加叶面积和干物质积累量; 在中度缺磷($P_{0.1}$)条件下加硅也可增加玉米的磷和氮、钾积累量, 促进根系和地上部生长, 缓解低磷胁迫; 在重度缺磷($P_{0.01}$)条件下, 增施硅对玉米根系生长和干物质积累无显著的改善作用, 但会增加根系中磷、钾素积累量。由此表明, 硅和磷存在显著的协同作用和配合效应, 生产上硅和磷应配施。

关键词: 玉米; 苗期; 硅磷配施; 养分积累; 养分利用; 干物质积累

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)05-0677-12

Effect of phosphorus and silicon application on the uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium by maize seedlings*

ZHANG Jiali[1,2], ZHU Conghua[1,2], DOU Pan[1], MA Xiaojun[1], WANG Xinglong[1], KONG Fanlei[1,2], YUAN Jichao[1,2]**

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China)

Abstract: This study tested the effect of three levels of phosphorus (P) [1.0 mmol(P)·L^{-1} ($P_{1.0}$), 0.1 mmol(P)·L^{-1} ($P_{0.1}$) and 0.01 mmol(P)·L^{-1} ($P_{0.01}$)] and three levels of silicon (Si) [1.5 mmol(Si)·L^{-1} ($Si_{1.5}$), 0.75 mmol(Si)·L^{-1} ($Si_{0.75}$) and 0 mmol(Si)·L^{-1} (Si_0)] on a range of characteristics of 'Zhenghong 2' and 'Zhenghong 115' maize cultivars. The study analyzed dry matter, leaf area, root morphology and NPK contents of maize to determine the effects of the combined application of Si and P on maize root growth, dry mat-

* 国家科技支撑计划项目(2012BAD04B13-2)、公益性行业(农业)科研专项(20150312705)和国家重点研发计划(2016YFD0300307)资助
** 通讯作者: 袁继超, 主要研究方向为作物高产优质高效栽培理论与技术研究。E-mail: yuanjichao5@163.com
张嘉莉, 主要从事作物高产优质高效栽培理论与技术研究。E-mail: zhang_jiali1234@163.com
收稿日期: 2017-03-15 接受日期: 2017-04-01

* Supported by the National Key Technologies R&D Program of China (2012BAD04B13-2), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (20150312705) and the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0300307).
** Corresponding author, E-mail: yuanjichao5@163.com
Received Mar. 15, 2017; accepted Apr. 1, 2017

ter accumulation and NPK accumulation and utilization at seedling stage. The results indicated that P deficiency not only suppressed maize seedling growth, but also decreased root length, root volume, root surface area, leaf area, NPK assimilation and dry matter accumulation, and the effects were strengthened with decreasing P concentration. The enhanced maize root-to-shoot ratio at seedling stage increased the distribution rates of P and N in root system and the accumulation efficiency of NPK in dry matter, which improved the adaptation of rice to P-deficient environments. P deficiency stress enhanced root growth and P absorption and accumulation more in ‘Zhenghong 115’ than in ‘Zhenghong 2’ maize cultivar. However, the distribution rate in the root system of ‘Zhenghong 115’ maize cultivar increased substantially under P deficiency. Si accelerated maize root growth, increased NPK accumulation, improved the distribution rate of NPK in aboveground system, increased leaf area and dry matter accumulation under normal P condition ($P_{1.0}$). Under medium P deficiency ($P_{0.1}$), the application of Si alleviated P deficiency stress through increasing NPK accumulation in maize seedlings, furthermore, it also accelerated growth of both root and shoot system. Under severe P deficiency ($P_{0.01}$), the application of Si had no significant effect on root growth and dry matter accumulation, but it increased the PK accumulation in root system. It was therefore concluded that there existed significant synergetic and coordination effects of P and Si on beneficial traits of maize at seedling stage.

Keywords: Maize; Seedling stage; Combined phosphorus and silicon application; Nutrient accumulation; Nutrient utilization; Dry matter accumulation

玉米(*Zea mays* L.)是重要的粮饲兼用及能源作物，其稳产高产受资源、环境及土壤养分特性的影响。近年来开展测土配方施肥，发现土壤磷含量有所增加，但生产中缺磷土壤依然普遍存在[1-3]，粮油作物生产需要大量施用磷肥。磷肥用量持续增长，一方面导致磷肥利用率降低，目前我国粮食作物的磷肥利用率仅为 11.6%[4]；另一方面造成磷矿资源的大量消耗，按当前年均磷肥用量估算磷矿资源将在未来 50 年内被耗竭[5]。玉米是需磷较多的作物，对缺磷环境也非常敏感。而土壤缺磷是当今农业生产中限制作物生长发育与产量提高的主要因素之一。有的土壤总磷含量不低，但其可利用磷含量低，不能满足作物生长发育的需求，从而对作物造成危害。缺磷会导致玉米器官物质积累减少[6]，根系生长受到抑制[7]，光合能力下降[8]，氮、磷和钾等[9-12]养分积累减少，磷代谢关键酶活性降低[13]，产量显著下降[6]。硅是玉米等作物的有益元素，在地壳中含量丰富，且在结构和化学性质上与磷非常相似，玉米各器官硅含量约为 4~75 $g\cdot kg^{-1}$，各器官氮、磷、钾含量与其硅含量呈一定正相关[14]，施硅能改善作物对硅[15]、氮、磷和钾等养分吸收利用[16-17]，增加作物产量[18-20]。硅和磷由于相似的化学性质可能存在肥效的互促关系，有研究认为硅能缓解玉米的低磷胁迫[21]，施硅能改善土壤养分供应能力[22-23]。硅、磷配施能否促进玉米苗期根系生长和干物质积累，同时改善其对氮、磷及钾的吸收利用，尚不清楚。为此，本研究采用砂培试验，研究硅、磷配施对玉米苗期植株生长及氮、磷、钾养分吸收利用的影响，以期为制定氮、磷、钾和硅肥配套高效利用技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试玉米品种为‘正红 2 号’和‘正红 115’[24]，由四川农业大学正红生物技术有限责任公司提供。

1.2 试验设计

试验于 2014 年 5—6 月在四川农业大学成都校区温室大棚内采用砂培试验方式进行。

参考 Yang 等[21]的研究，采用裂区试验设计，以磷为主区因素，设置 3 个磷水平：培养液纯磷浓度分别为 1.0 $mmol\cdot L^{-1}$(正常)、0.1 $mmol\cdot L^{-1}$(中度缺磷)和 0.01 $mmol\cdot L^{-1}$(重度缺磷)，分别记为 $P_{1.0}$、$P_{0.1}$和 $P_{0.01}$；以硅浓度为副区因素，设置 3 个硅水平：营养液纯硅浓度分别为 1.5 $mmol\cdot L^{-1}$、0.75 $mmol\cdot L^{-1}$和 0 $mmol\cdot L^{-1}$，分别记为 $Si_{1.5}$、$Si_{0.75}$和 Si_0。每个处理培养 6 盆，重复 3 次，两个品种合计 324 盆。

基本营养液的组成成分：2.5 $mmol\cdot L^{-1}$ $Ca(NO_3)_2$、1.0 $mmol\cdot L^{-1}$ K_2SO_4、0.65 $mmol\cdot L^{-1}$ $MgSO_4$、5.0 $mmol\cdot L^{-1}$ $CaCl_2$、1.0 $\mu mol\cdot L^{-1}$ H_3BO_4、2.0 $\mu mol\cdot L^{-1}$ $MnSO_4$、1.0 $\mu mol\cdot L^{-1}$ $ZnSO_4$、0.3 $\mu mol\cdot L^{-1}$ $CuSO_4$、0.5 $\mu mol\cdot L^{-1}$ $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$、200 $\mu mol\cdot L^{-1}$ Fe-EDT，磷源为 KH_2PO_4，硅源为 Na_2SiO_3。缺磷营养液用 KCl 补充 K^+浓度，营养液 pH 5.8。

砂培基质为石英砂(0.5~2 mm)，用 10%盐酸浸泡 3 h，用自来水冲洗 20 min，用蒸馏水洗净后装盆(盆内径为 20 cm，高度为 25 cm，每盆装 7.5 kg)。

玉米种子用 2%次氯酸钠浸泡消毒 20 min，蒸馏水洗净并浸泡 4 h，每盆播种 15 粒，播种深度 5 cm，播种后每天上午 9:30 和下午 16:00 每盆浇 0.2 L 蒸馏

水以保证均匀出苗，待 2 叶 1 心后定苗，每盆保留 8 株长势一致的壮苗。

定苗后每间隔 2 d 于上午 9:30 浇 1 L 不同硅磷配比的培养液(浇培养液前用 1.5 L 蒸馏水浸润盆中石英砂)，培养 15 d 后，培养液浇灌频率调整为间隔 1 d。

1.3　测定指标与方法

定苗后采用不同营养液培养 4 周后取样测定如下指标。

1.3.1　干物质及叶面积

选取 3 盆具代表性植株样，分为根、茎鞘、叶，于烘箱中 105 ℃杀青 30 min，80 ℃烘至恒重，并称重，平行测定 3 次。用长宽系数法(系数为 0.75)测定叶面积。

1.3.2　根系形态

将 1.3.1 中的代表性植株，用根系扫描仪(Epson Expression 1000xl, WinRHIZO 软件)分析测定根系总长、根系总体积、根系总表面积和根系平均直径，平行测定 3 次。

1.3.3　植株氮、磷、钾含量

将 1.3.1 中称完干重后的样品粉碎，采用浓 H_2SO_4-H_2O_2 消煮，用 BUCHI Distillation Unit K-355(凯氏蒸馏仪)+HanonT860(全自动电位滴定仪)测定含氮量，用 FP6410 型火焰光度计测定含钾量，用矾钼黄比色法测定含磷量，并计算其氮、磷、钾积累量。

1.4　数据分析

氮(磷、钾)干物质生产率($mg\cdot mg^{-1}$)=整株干物质量(mg)/整株氮(磷、钾)素积累总量(mg)　　(1)

用 DPS 7.05 软件进行试验数据分析，用最小显著差法 LSD 检验平均数。

2　结果与分析

2.1　不同磷硅处理玉米苗期干物质、根冠比及叶面积

从表 1 可见，低磷胁迫下玉米苗干物质积累和叶面积显著降低，其中茎叶降幅显著高于根系降幅，从而增加了根冠比。品种间苗期干物质积累量及叶面积差异不显著，但磷水平、硅水平却显著影响各器官干物质积累和叶面积。品种与磷水平互作对干物质没有显著影响，但对叶面积的影响差异极显著；品种与硅水平互作在干物质积累及叶面积上均存在显著或极显著差异；硅、磷互作也显著影响以上各指标。品种、磷水平、硅水平三者互作对全株干物质和叶面积的影响极显著。与对照($P_{1.0}$)相比，3 硅水平 2 品种平均，中度缺磷($P_{0.1}$)茎叶和根系干重分别降低 39.9%和 10.9%，根冠比提高 37.7%；而重度缺磷($P_{0.01}$)茎叶和根系干重分别降低 42.4%和 26.0%，根冠比提高 20.8%。在正常磷($P_{1.0}$)和中度缺磷($P_{0.1}$)条件下加硅能明显促进玉米苗的生长，扩大叶面积，增加各器官的干物质积累量，‘正红 2 号’正常磷($P_{1.0}$)、中度缺磷($P_{0.1}$)处理下，$Si_{1.5}$ 和 $Si_{0.75}$ 处理的全株干重分别较 Si_0 高 58.2%和 75.4%、4.7%和 5.0%，而‘正红 115’则分别高 106.3%和 46.2%、31.1%和 9.3%，‘正红 2 号’以 $Si_{0.75}$ 最佳，‘正红 115 号’则以 $Si_{1.5}$ 最好；在重度缺磷($P_{0.01}$)条件下加 1.5 $mmol\cdot L^{-1}$($Si_{1.5}$)也可在一定程度上提高‘正红 2 号’根系、‘正红 115’茎叶干重的效果，而 $Si_{0.75}$ 则没有效果，也就是说硅促进玉米幼苗生长的作用随磷浓度的降低而减弱，正常磷条件下效果最好，中度缺磷条件下次之，重度缺磷条件下最差，由此表明，硅和磷之间存在明显的协同作用。

2.2　不同磷硅处理玉米苗期根系形态特征

从表 2 可知，磷和硅水平对玉米幼苗的根长、根表面积、平均根粗、根体积均有显著影响，其影响程度在品种之间有一定差异，即部分根系形态指标的品种与磷水平、品种与硅水平、硅与磷水平以及品种、磷水平、硅水平的互作效应达显著水平。低磷胁迫会抑制植株根系生长，导致单株根重、根长、根表面积、平均根粗、根体积等均有不同程度降低，其中‘正红 115’降低的幅度较‘正红 2 号’大，以根表面积为例，3 个硅浓度平均，‘正红 2 号’中度缺磷($P_{0.1}$)和重度缺磷($P_{0.01}$)的根表面积分别较($P_{1.0}$)降低 6.3%和 28.1%，而‘正红 115’则分别降低 15.8%和 37.7%。硅有一定促进玉米幼苗根系生长的作用，增加根长和根体积、扩大根表面积，特别是正常磷和中度缺磷条件下，两品种均以 $Si_{1.5}$ 最好；在重度缺磷($P_{0.01}$)条件下加硅对‘正红 2 号’根系生长也有一定促进作用，但‘正红 115’则没有此效果。可见，施硅能促进正常磷水平下植株的根系生长，硅、磷表现出良好的互促效应和协同作用，在中度缺磷条件下增施硅主要是提高单株总根长和根表面积来增强植株对养分的吸收，缓解植株受到的低磷胁迫。

2.3　不同磷硅处理玉米苗期氮、磷、钾积累量及其分配

从表 3 可知，低磷处理显著降低了玉米植株单株磷积累量，并影响磷在各器官中的分配。品种间

表 1 硅磷互作对不同品种玉米苗期干物质积累、根冠比及叶面积的影响

Table 1 Effect of silicon and phosphorus interaction on dry matter weight, root/shoot ratio and leaf area of different varieties of maize at seedling stage

品种 Variety (V)	磷处理 P treatment (P)	硅处理 Si treatment (Si)	干物质重 Dry weight (g·plant^{-1}) 根 Root	茎鞘 Stem-sheath	叶 Leaf	全株 Whole plant	根冠比 Root shoot ratio (%)	叶面积 Leaf area (cm^2·plant^{-1})
正红 2 号 Zhenghong 2	$P_{1.0}$	$Si_{1.5}$	0.987±0.07b	1.080±0.17b	4.201±0.19a	6.268±0.21b	18.74±1.92b	585.25±26.21a
		$Si_{0.75}$	1.287±0.10a	1.379±0.14a	4.284±0.35a	6.950±0.56a	22.72±0.28b	619.17±50.29a
		Si_0	0.904±0.01b	0.873±0.10c	2.186±0.10b	3.963±0.18c	29.63±2.23a	279.52±12.60b
	平均 Average		1.059A	1.111A	3.557A	5.727A	23.70B	494.65A
	$P_{0.1}$	$Si_{1.5}$	0.886±0.01ab	0.801±0.14a	2.058±0.13a	3.745±0.01a	30.99±0.73a	296.72±19.06a
		$Si_{0.75}$	0.955±0.12a	0.703±0.05a	2.118±0.04a	3.775±0.17a	33.83±4.00a	287.69±5.13a
		Si_0	0.803±0.09b	0.696±0.04a	2.078±0.03a	3.577±0.10a	28.99±3.39a	220.63±3.55b
	平均 Average		0.881B	0.733B	2.084B	3.699B	31.27A	268.34B
	$P_{0.01}$	$Si_{1.5}$	0.838±0.05a	0.629±0.04a	1.998±0.07a	3.465±0.06a	31.96±2.93a	201.76±6.77a
		$Si_{0.75}$	0.834±0.19a	0.636±0.04a	2.048±0.11a	3.517±0.21a	31.10±7.06a	232.98±12.17a
		Si_0	0.735±0.09a	0.673±0.04a	2.192±0.23a	3.600±0.19a	25.97±5.65a	218.11±22.88a
	平均 Average		0.802B	0.647C	2.079B	3.528B	29.68A	217.62C
正红 115 Zhenghong 115	$P_{1.0}$	$Si_{1.5}$	1.227±0.11a	1.730±0.27a	5.298±0.75a	8.255±1.01a	17.72±3.04b	430.84±60.57a
		$Si_{0.75}$	1.170±0.13a	1.055±0.21b	3.621±0.09b	5.846±0.20b	25.21±4.26b	376.64±9.80b
		Si_0	1.054±0.09b	0.845±0.03b	2.100±0.11c	4.000±0.17c	35.83±3.20a	365.73±18.76b
	平均 Average		1.151A	1.210A	3.673A	6.033A	26.25B	391.07A
	$P_{0.1}$	$Si_{1.5}$	1.167±0.18a	0.823±0.10a	2.652±0.28a	4.634±0.48a	33.72±4.82b	349.98±37.11a
		$Si_{0.75}$	1.151±0.24a	0.661±0.04a	2.048±0.07b	3.861±0.35ab	42.32±7.68a	286.67±10.42b
		Si_0	0.945±0.09b	0.592±0.10a	1.996±0.15b	3.534±0.26b	36.57±3.19ab	290.16±21.39b
	平均 Average		1.088AB	0.692B	2.232B	4.012B	37.54A	308.94B
	$P_{0.01}$	$Si_{1.5}$	0.845±0.07a	0.750±0.13a	2.514±0.59a	4.109±0.78a	26.59±4.99a	213.80±50.06a
		$Si_{0.75}$	0.831±0.08a	0.558±0.03a	1.880±0.03b	3.270±0.04b	34.14±3.76a	139.75±2.11b
		Si_0	0.823±0.14a	0.648±0.03a	1.976±0.24ab	3.448±0.38ab	31.26±3.05a	182.07±22.22ab
	平均 Average		0.833B	0.652B	2.123B	3.610B	30.66AB	178.54C
F 值 *F* value	V		7.10^{ns}	0.91^{ns}	1.15^{ns}	2.53^{ns}	20.89^{*}	14.12^{ns}
	P		12.42^{**}	471.45^{**}	359.07^{**}	319.23^{**}	14.98^{**}	778.13^{**}
	Si		19.79^{**}	14.83^{**}	64.96^{**}	59.70^{**}	10.66^{**}	47.04^{**}
	V × P		1.19^{ns}	7.76^{*}	0.34^{ns}	0.88^{ns}	1.23^{ns}	66.24^{**}
	V × Si		4.26^{*}	11.22^{**}	18.70^{**}	21.16^{**}	5.37^{*}	33.46^{**}
	P × Si		2.66^{ns}	6.57^{**}	41.74^{**}	31.31^{**}	10.11^{**}	23.16^{**}
	V × P × Si		2.92^{*}	5.00^{**}	2.00^{ns}	4.25^{**}	0.38^{ns}	15.08^{**}

$P_{1.0}$: 培养液纯磷浓度为 1.0 mmol·L^{-1}; $P_{0.1}$: 培养液纯磷浓度为 0.1 mmol·L^{-1}; $P_{0.01}$: 培养液纯磷浓度为 0.01 mmol·L^{-1}。$S_{1.5}$: 培养液纯硅浓度为 1.5 mmol·L^{-1}; $S_{0.75}$: 培养液纯硅浓度为 0.75 mmol·L^{-1}; S_0: 培养液中无硅。同列不同小写字母表示相同磷浓度下不同硅浓度间差异达 5%显著水平, 同列不同大写字母表示不同磷浓度间差异达 5%显著水平; *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。$P_{1.0}$, $P_{0.1}$ and $P_{0.01}$ mean that the P concentrations of culture media are 1.0 mmol·L^{-1}, 0.1 mmol·L^{-1} and 0.01 mmol·L^{-1}, respectively. $Si_{1.5}$, $Si_{0.75}$ and Si_0 mean that the Si concentrations of the culture media of 1.5 mmol·L^{-1}, 0.75 mmol·L^{-1} and 0 mmol·L^{-1}, respectively. Different lowercase letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different Si concentrations for the same P concentration. Different capital letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different P concentrations. * and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

的磷积累总量差异不显著, 但根系和地上部的磷分配比例存在显著差异; 磷水平、硅水平显著影响玉米苗的磷积累总量和分配率。品种与硅水平互作显著影响磷积累总量; 品种与磷水平互作、硅磷互作以及品种、磷水平、硅水平三者互作显著影响以上各指标。与对照($P_{1.0}$)相比, ‘正红 2 号’中度缺磷($P_{0.1}$)和重度缺磷($P_{0.01}$)的平均单株磷积累量分别降低 76.5%和 84.6%, 根分配比例则分别提高 40.8%和

表 2　硅磷配施对不同品种玉米苗期根系特征的影响

Table 2　Effect of silicon and phosphorus interaction on root characters of different varieties of maize at seedling stage

品种 Variety (V)	磷处理 P treatment (P)	硅处理 Si treatment (Si)	单株总根长 Total root length (cm)	单株根表面积 Root surface area (cm^2)	平均根粗 Average root diameter (mm)	单株根体积 Root volume (cm^3)
正红 2 号 Zhenghong 2	$P_{1.0}$	$Si_{1.5}$	1 085.78±228.88a	290.03±12.57a	1.10±0.07a	6.13±0.89a
		$Si_{0.75}$	711.96±120.18b	212.08±18.46b	0.96±0.08b	5.05±0.31b
		Si_0	537.17±53.47b	184.42±18.34b	1.09±0.05a	5.05±0.60b
	平均 Average		778.30A	228.84A	1.05A	5.41A
	$P_{0.1}$	$Si_{1.5}$	975.27±80.07a	251.25±19.41a	0.81±0.01a	5.20±0.38a
		$Si_{0.75}$	779.16±57.60b	209.91±16.10b	0.82±0.06a	4.57±0.38ab
		Si_0	669.56±75.02b	181.78±13.37b	0.87±0.03a	3.93±0.14b
	平均 Average		808.00A	214.31A	0.84B	4.57B
	$P_{0.01}$	$Si_{1.5}$	668.31±128.67a	172.81±32.99a	0.82±0.02a	3.87±0.42a
		$Si_{0.75}$	671.38±66.83a	168.63±5.43a	0.80±0.06a	3.38±0.17a
		Si_0	592.03±27.49a	151.87±10.54a	0.79±0.02a	3.11±0.35a
	平均 Average		643.91B	164.43B	0.81B	3.54C
正红 115 Zhenghong 115	$P_{1.0}$	$Si_{1.5}$	1 113.97±196.61a	361.01±18.40a	1.17±0.06a	9.80±1.05a
		$Si_{0.75}$	1 015.05±11.86a	301.26±9.25b	0.95±0.04b	5.73±2.48b
		Si_0	834.66±22.22b	207.37±37.03c	1.00±0.07b	5.35±0.50b
	平均 Average		987.89A	289.88A	1.04A	6.96A
	$P_{0.1}$	$Si_{1.5}$	987.65±135.87a	269.56±31.86a	0.91±0.04a	4.40±1.95a
		$Si_{0.75}$	835.16±122.21b	228.51±30.04b	0.87±0.02ab	4.98±0.59a
		Si_0	613.17±13.23c	234.32±64.24b	0.82±0.02b	4.82±1.27a
	平均 Average		811.99B	244.13B	0.87B	4.73B
	$P_{0.01}$	$Si_{1.5}$	743.82±27.73a	177.66±32.05a	0.76±0.05a	3.38±0.17a
		$Si_{0.75}$	745.61±24.27a	180.55±27.18a	0.77±0.02a	3.48±0.26a
		Si_0	800.64±37.24a	183.66±9.54a	0.73±0.01a	3.35±0.35a
	平均 Average		763.36B	180.62C	0.75C	3.40C
F 值 *F* value	V		6.62^{ns}	10.98^{ns}	9.77^{ns}	2.06^{ns}
	P		14.34^{**}	37.01^{**}	260.04^{**}	38.55^{**}
	Si		32.02^{**}	47.80^{**}	8.16^{**}	11.42^{**}
	V × P		4.67^{*}	2.52^{ns}	6.84^{*}	3.82^{ns}
	V × Si		1.94^{ns}	0.22^{ns}	4.73^{*}	0.32^{ns}
	P × Si		7.69^{**}	15.55^{**}	5.86^{**}	6.28^{**}
	V × P × Si		1.81^{ns}	3.36^{*}	1.18^{ns}	5.05^{**}

$P_{1.0}$: 培养液纯磷浓度为 1.0 mmol·L^{-1}; $P_{0.1}$: 培养液纯磷浓度为 0.1 mmol·L^{-1}; $P_{0.01}$: 培养液纯磷浓度为 0.01 mmol·L^{-1}。$S_{1.5}$: 培养液纯硅浓度为 1.5 mmol·L^{-1}; $S_{0.75}$: 培养液纯硅浓度为 0.75 mmol·L^{-1}; S_0: 培养液中无硅。同列不同小写字母表示相同磷浓度下不同硅浓度间差异达 5%显著水平, 同列不同大写字母表示不同磷浓度间差异达 5%显著水平; *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。$P_{1.0}$, $P_{0.1}$ and $P_{0.01}$ mean that the P concentrations of culture media are 1.0 mmol·L^{-1}, 0.1 mmol·L^{-1} and 0.01 mmol·L^{-1}, respectively. $Si_{1.5}$, $Si_{0.75}$ and Si_0 mean that the Si concentrations of the culture media of 1.5 mmol·L^{-1}, 0.75 mmol·L^{-1} and 0 mmol·L^{-1}, respectively. Different lowercase letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different Si concentrations for the same P concentration. Different capital letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different P concentrations. * and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

37.9%; ‘正红 115’的平均单株磷积累量则分别降低 85.4%和 89.0%, 根分配比例则分别提高 182.9%和 147.3%, ‘正红 115’受影响的程度大于‘正红 2 号’。玉米植株对磷素的吸收积累在硅处理间的差异也极显著。增硅可以促进玉米植株对磷素的吸收积累, 这种效应随磷水平的增加而增强, 在正常磷水平($P_{1.0}$)下, 两品种平均, $Si_{1.5}$ 和 $Si_{0.75}$ 处理磷积累量分别较对照 Si_0 提高 102.8%和 56.1%, 中度缺磷条件($P_{0.1}$)下的提高幅度分别为 80.1%和 43.1%, 而重度缺磷条件($P_{0.01}$)下的增幅分别为 22.1%和 9.5%, 其中 $Si_{1.5}$ 的上述效应‘正红 115’大于‘正红 2 号’, 而 $Si_{0.75}$ 的上述效应则相反, ‘正红 2 号’大于‘正红 115’。硅

对磷素的分配也有一定影响，特别是在磷水平较高时，在正常磷和中度缺磷条件下加硅均可以降低两品种磷素在根系中的分配比例，提高磷素在地上部的分配率。

表 3 硅磷互作对不同品种玉米单株磷积累量和根、地上部分配率的影响

Table 3 Effect of silicon and phosphorus interaction on accumulation and root, shoot distribution rates of phosphorus of different varieties of maize at seedling stage

磷处理 P treatment (P)	硅处理 Si treatment (Si)	正红 2 号 Zhenghong 2 (V)			正红 115 Zhenghong 115 (V)		
		整株磷积累量 P accumulation amount (mg·plant^{-1})	分配率 Distribution rate (%)		整株磷积累量 P accumulation amount (mg·plant^{-1})	分配率 Distribution rate (%)	
			根 Root	地上部 Shoot		根 Root	地上部 Shoot
$P_{1.0}$	$Si_{1.5}$	26.76±0.98b	10.88±0.97c	89.12±0.97a	33.95±5.39a	9.34±1.33c	90.66±1.33a
	$Si_{0.75}$	29.56±3.75a	13.24±0.20b	86.76±0.20a	17.15±1.54b	19.91±2.05a	80.09±2.05c
	Si_0	14.94±1.35c	20.30±1.33a	79.70±1.33b	14.99±0.84c	13.61±1.05b	86.39±1.05b
平均 Average		23.75A	14.81B	85.19A	22.03A	14.29B	85.71A
$P_{0.1}$	$Si_{1.5}$	6.79±0.52a	18.39±0.62b	81.61±0.62a	4.41±0.62a	33.79±3.31b	66.21±3.31a
	$Si_{0.75}$	5.89±0.46a	21.37±2.10a	78.63±2.10ab	3.02±0.50a	41.73±4.32a	58.27±4.32b
	Si_0	4.03±0.29b	22.78±2.06a	77.22±2.06b	2.19±0.25a	45.79±4.12a	54.21±4.12b
平均 Average		5.57B	20.85A	79.15B	3.21B	40.43A	59.57B
$P_{0.01}$	$Si_{1.5}$	3.79±0.15a	21.39±1.50b	78.61±1.50b	2.92±0.57a	33.61±3.87a	66.39±3.87a
	$Si_{0.75}$	4.00±0.37a	25.52±4.16a	74.48±4.16c	2.01±0.12a	38.18±2.93a	61.82±2.93a
	Si_0	3.17±0.20a	14.35±2.57c	85.65±2.57a	2.32±0.32a	34.23±2.58a	65.78±2.58a
平均 Average		3.65C	20.42A	79.58B	2.42B	35.34A	64.66B
F 值	V	2.32^{ns}	267.73**	267.73**			
F value	P	1 090.84**	169.25**	169.25**			
	Si	89.36**	21.25**	21.25**			
	V × P	9.81**	69.06**	69.06**			
	V × Si	15.71**	3.12^{ns}	3.12^{ns}			
	P × Si	55.08**	14.79**	14.79**			
	V × P × Si	12.47**	4.97**	4.97**			

$P_{1.0}$：培养液纯磷浓度为 1.0 mmol·L^{-1}；$P_{0.1}$：培养液纯磷浓度为 0.1 mmol·L^{-1}；$P_{0.01}$：培养液纯磷浓度为 0.01 mmol·L^{-1}。$S_{1.5}$：培养液纯硅浓度为 1.5 mmol·L^{-1}；$S_{0.75}$：培养液纯硅浓度为 0.75 mmol·L^{-1}；S_0：培养液中无硅。同列不同小写字母表示相同磷浓度下不同硅浓度间差异达 5%显著水平，同列不同大写字母表示不同磷浓度间差异达 5%显著水平；*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。$P_{1.0}$, $P_{0.1}$ and $P_{0.01}$ mean that the P concentrations of culture media are 1.0 mmol·L^{-1}, 0.1 mmol·L^{-1} and 0.01 mmol·L^{-1}, respectively. $Si_{1.5}$, $Si_{0.75}$ and Si_0 mean that the Si concentrations of the culture media of 1.5 mmol·L^{-1}, 0.75 mmol·L^{-1} and 0 mmol·L^{-1}, respectively. Different lowercase letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different Si concentrations for the same P concentration. Different capital letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different P concentrations. * and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

从表 4 可见，低磷胁迫也显著降低单株氮积累量，提高了氮素在根系中的分配率，品种间的氮积累总量差异不显著，但根系和地上部的氮分配比例存在显著差异；磷水平、硅水平显著影响玉米苗的氮积累总量和分配率。品种与磷水平互作、品种与硅水平互作显著影响氮积累总量；硅磷互作显著影响着氮积累总量和分配率。品种、磷水平、硅水平三者互作的效应也极显著。两品种 3 硅水平平均，中度缺磷($P_{0.1}$)和重度缺磷($P_{0.01}$)条件下单株氮积累量分别较对照($P_{1.0}$)降低 52.9%和 56.6%，根系中的分配率分别提高 17.7%和 5.7%。在正常磷($P_{1.0}$)条件加 1.5 mmol·L^{-1}($Si_{1.5}$)和 0.75 mmol·L^{-1} 硅($Si_{0.75}$)可以显著提高氮素积累量，平均提高 123.1%和 62.7%；1.5 mmol·L^{-1} 的硅($Si_{1.5}$)也可在一定程度上提高‘正红 115’在中度缺磷($P_{0.1}$)和重度缺磷($P_{0.01}$)条件下的氮素积累量，但对‘正红 2 号’则影响不显著；0.75 mmol·L^{-1} 的硅($Si_{0.75}$)对两个品种在中度缺磷($P_{0.1}$)和重度缺磷($P_{0.01}$)条件下的氮积累量影响均不显著。

从表 5 可以看出，两供试品种单株钾积累量无显著差异，但地上部和地下部的分配率差异显著；磷和硅水平均显著影响钾积累量，硅水平还显著影响钾素分配；除品种与硅水平互作对钾分配影响不显著外，品种与磷、品种与硅水平、磷和硅水平以及品种、磷水平与硅水平互作均显著影响钾积累量及其分配。低磷胁迫同样降低了玉米幼苗的钾积累量，只是降低的幅度小于氮积累量，更小于磷积累量，两品种 3 硅水

表 4　硅磷互作对不同品种玉米单株氮积累量和根、地上部分配率的影响

Table 4　Effect of silicon and phosphorus interaction on accumulation, and root, stems, leaves distribution rates of nitrogen of different varieties of maize at seedling stage

磷处理 P treatment (P)	硅处理 Si treatment (Si)	正红 2 号 Zhenghong 2 (V)			正红 115 Zhenghong115 (V)		
		整株氮积累量 N accumulation amount (mg·plant^{-1})	分配率 Distribution rate (%)		整株氮积累量 N accumulation amount (mg·plant^{-1})	分配率 Distribution rate (%)	
			根 Root	地上部 Shoot		根 Root	地上部 Shoot
$P_{1.0}$	$Si_{1.5}$	170.16±7.00a	9.19±0.79c	90.81±0.79a	246.71±35.99a	6.33±1.02c	93.67±1.02a
	$Si_{0.75}$	179.72±23.06a	12.60±0.11b	87.40±0.11b	111.20±9.97b	14.26±1.53a	85.74±1.53c
	Si_0	82.85±7.05b	19.85±1.22a	80.15±1.22c	102.48±5.93b	11.09±0.88b	88.91±0.88b
平均 Average		144.25A	13.88A	86.12A	153.47A	10.56A	89.44A
$P_{0.1}$	$Si_{1.5}$	64.74±3.63a	18.31±0.36a	81.69±0.36b	86.84±10.92a	10.55±1.36b	89.45±1.36a
	$Si_{0.75}$	72.17±5.44a	16.57±1.69ab	83.43±1.69ab	65.34±6.90b	10.35±1.70b	89.65±1.70a
	Si_0	65.30±4.27a	15.81±1.56b	84.19±1.56a	65.97±7.73ab	15.08±1.05a	84.92±1.05b
平均 Average		67.40B	16.90A	83.10A	72.72B	12.00A	88.00A
$P_{0.01}$	$Si_{1.5}$	65.37±2.24a	14.77±1.13a	85.23±1.13a	72.57±16.67a	11.85±1.96ab	88.15±1.96ab
	$Si_{0.75}$	67.45±5.92a	14.25±2.79a	85.75±2.79a	53.75±2.41a	13.36±1.25a	86.64±1.25b
	Si_0	66.43±4.77a	13.10±2.47a	86.90±2.47a	61.37±9.65a	9.73±0.86b	90.27±0.86a
平均 Average		66.42B	14.04A	85.96A	62.56B	11.65A	88.35A
F 值 *F* value	V	6.58^{ns}	212.54^{**}	212.54^{**}			
	P	842.31^{**}	12.00^{**}	12.00^{**}			
	Si	71.30^{**}	13.06^{**}	13.06^{**}			
	V × P	16.07^{**}	2.72^{ns}	2.72^{ns}			
	V × Si	23.68^{**}	1.29^{ns}	1.29^{ns}			
	P × Si	50.85^{**}	22.73^{**}	22.73^{**}			
	V × P × Si	6.00^{**}	11.07^{**}	11.07^{**}			

$P_{1.0}$：培养液纯磷浓度为 1.0 mmol·L^{-1}; $P_{0.1}$：培养液纯磷浓度为 0.1 mmol·L^{-1}; $P_{0.01}$：培养液纯磷浓度为 0.01 mmol·L^{-1}。$S_{1.5}$：培养液纯硅浓度为 1.5 mmol·L^{-1}; $S_{0.75}$：培养液纯硅浓度为 0.75 mmol·L^{-1}; S_0：培养液中无硅。同列不同小写字母表示相同磷浓度下不同硅浓度间差异达 5%显著水平，同列不同大写字母表示不同磷浓度间差异达 5%显著水平；*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。$P_{1.0}$, $P_{0.1}$ and $P_{0.01}$ mean that the P concentrations of culture media are 1.0 mmol·L^{-1}, 0.1 mmol·L^{-1} and 0.01 mmol·L^{-1}, respectively. $Si_{1.5}$, $Si_{0.75}$ and Si_0 mean that the Si concentrations of the culture media of 1.5 mmol·L^{-1}, 0.75 mmol·L^{-1} and 0 mmol·L^{-1}, respectively. Different lowercase letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different Si concentrations for the same P concentration. Different capital letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different P concentrations. * and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

平平均，中度缺磷($P_{0.1}$)和重度缺磷($P_{0.01}$)钾积累量分别较对照($P_{1.0}$)降低 23.3%和 31.7%；磷水平对钾的分配也有一定影响，有提高根系分配率，降低茎叶分配率的趋势。在正常磷($P_{1.0}$)条件下施硅可显著提高两品种的钾积累量，并降低其在根系中的分配率，$Si_{1.5}$ 和 $Si_{0.75}$ 处理的平均钾积累量分别较不施硅(Si_0)提高 90.5%和 45.9%，根系分配率降低 68.7%和 30.3%；在中度缺磷($P_{0.1}$)条件下加 1.5 mmol·L^{-1} 的硅($Si_{1.5}$)也可在一定程度上提高两品种的钾积累量(平均提高幅度为 29.8%)，但 $Si_{0.75}$ 处理效果不明显。

2.4　不同磷硅处理玉米苗期氮、磷、钾干物质生产效率

从表 6 得出，品种、硅、磷水平均显著影响着玉米苗期氮、磷、钾素干物质生产率，而且两两间的互作效应也达到显著或极显著水平。总体而言，‘正红 115’的磷素干物质生产率(PDMP)显著高于‘正红 2 号’，特别低磷胁迫条件下，3 个硅水平平均，$P_{1.0}$、$P_{0.1}$ 和 $P_{0.01}$ 处理下‘正红 2 号’的 PDMP 分别较‘正红 115’低 13.6%、47.4%和 35.2%；在重度缺磷($P_{0.01}$)条件下，‘正红 2 号’的氮素干物质生产率(NDMP)低于‘正红 115 号’，而钾素干物质生产率(KDMP)则高于‘正红 115’。低磷胁迫大幅度提高两品种的 PDMP 和 NDMP，降低了 KDMP，两品种 3 硅水平平均，与 $P_{1.0}$ 相比，$P_{0.1}$ 和 $P_{0.01}$ 处理的 PDMP 提高 274.0%和 363.6%，NDMP 提高 33.2%和 34.1%，KDMP 降低 15.4%和 12.2%，其中‘正红 115’的提高或降低幅度大于‘正红 2 号’。硅浓度对 NDMP、PDMP 和 KDMP 也有一定影响，但影响的程度及趋势因品种和磷水平而异，与不施硅(Si_0)相比，$Si_{1.5}$ 和 $Si_{0.75}$ 处理显著降低了 3 种磷水平下‘正红 2 号’的 PDMP 和中度缺磷($P_{0.1}$)条件下‘正红 115’的 PDMP，也降低了正常磷($P_{1.0}$)条件下‘正红 2 号’的 NDMP。

表 5 硅磷互作对不同品种玉米单株钾积累量和根、地上部分配率的影响

Table 5 Effect of silicon and phosphorus interaction on accumulation, and root, stems, leaves distribution rates of potassium of different varieties of maize at seedling stage

磷处理 P treatment (P)	硅处理 Si treatment (Si)	正红 2 号 Zhenghong 2 (V)			正红 115 Zhenghong 115 (V)		
		整株钾积累量 K accumulation amount (mg·plant^{-1})	分配率 Distribution rate (%)		整株钾积累量 K accumulation amount (mg·plant^{-1})	分配率 Distribution rate (%)	
			根 Root	地上部 Shoot		根 Root	地上部 Shoot
$P_{1.0}$	$Si_{1.5}$	179.47±3.58a	5.46±0.58c	94.54±0.58a	237.06±35.88a	4.53±0.76c	95.47±0.76a
	$Si_{0.75}$	188.78±24.06a	9.97±0.13b	90.03±0.13b	123.67±12.28b	11.73±1.37b	88.27±1.37b
	Si_0	102.26±8.95b	18.51±1.18a	81.49±1.18c	115.31±6.48b	13.72±1.07a	86.28±1.07c
平均 Average		156.84A	11.31A	88.69A	158.68A	9.99A	90.01A
$P_{0.1}$	$Si_{1.5}$	141.85±7.25a	10.31±0.22b	89.69±0.22a	141.62±17.80a	8.70±1.15b	91.30±1.15a
	$Si_{0.75}$	112.31±8.73b	13.68±1.37a	86.32±1.37b	111.69±11.80b	8.68±1.43b	91.32±1.43a
	Si_0	109.35±7.18b	13.63±1.37a	86.37±1.37b	109.06±12.47b	11.84±1.03a	88.16±1.03b
平均 Average		121.17B	12.54A	87.46A	120.79B	9.74A	90.26A
$P_{0.01}$	$Si_{1.5}$	103.00±3.11a	13.35±1.09a	86.65±1.09b	130.30±29.53a	9.54±1.57b	90.46±1.57a
	$Si_{0.75}$	100.98±8.50a	11.43±2.20a	88.57±2.20b	101.78±4.25a	12.11±1.21a	87.89±1.21b
	Si_0	103.47±7.66a	9.26±1.78b	90.74±1.78a	106.90±15.74a	13.44±1.16a	86.56±1.16b
平均 Average		102.48C	11.35A	88.65A	112.99B	11.70A	88.30A
F 值 *F* value	V	4.38^{ns}	45.51^{*}	45.51^{*}			
	P	296.91^{**}	4.29^{ns}	4.29^{ns}			
	Si	58.73^{**}	75.99^{**}	75.99^{**}			
	V × P	6.33^{*}	6.02^{*}	6.02^{*}			
	V × Si	7.96^{**}	1.68^{ns}	1.68^{ns}			
	P × Si	22.02^{**}	38.24^{**}	38.24^{**}			
	V × P × Si	3.33^{*}	12.63^{**}	12.63^{**}			

$P_{1.0}$: 培养液纯磷浓度为 1.0 mmol·L^{-1}; $P_{0.1}$: 培养液纯磷浓度为 0.1 mmol·L^{-1}; $P_{0.01}$: 培养液纯磷浓度为 0.01 mmol·L^{-1}。$S_{1.5}$: 培养液纯硅浓度为 1.5 mmol·L^{-1}; $S_{0.75}$: 培养液纯硅浓度为 0.75 mmol·L^{-1}; S_0: 培养液中无硅。同列不同小写字母表示相同磷浓度下不同硅浓度间差异达 5%显著水平, 同列不同大写字母表示不同磷浓度间差异达 5%显著水平; *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。$P_{1.0}$, $P_{0.1}$ and $P_{0.01}$ mean that the P concentrations of culture media are 1.0 mmol·L^{-1}, 0.1 mmol·L^{-1} and 0.01 mmol·L^{-1}, respectively. $Si_{1.5}$, $Si_{0.75}$ and Si_0 mean that the Si concentrations of the culture media of 1.5 mmol·L^{-1}, 0.75 mmol·L^{-1} and 0 mmol·L^{-1}, respectively. Different lowercase letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different Si concentrations for the same P concentration. Different capital letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different P concentrations. * and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 6 硅磷互作对不同品种玉米氮、磷、钾物质生产效率的影响

Table 6 Effect of silicon and phosphorus interaction on dry matter productivity of nitrogen, phosphorus and potassium of different varieties of maize at seedling stage mg·mg^{-1}

磷处理 P treatment (P)	硅处理 Si treatment (Si)	正红 2 号 Zhenghong2 (V)			正红 115 Zhenghong115 (V)		
		NDMP	PDMP	KDMP	NDMP	PDMP	KDMP
$P_{1.0}$	$Si_{1.5}$	36.88±2.05c	234.44±12.17b	34.93±1.27c	33.58±2.13c	243.90±15.24b	34.97±2.43b
	$Si_{0.75}$	38.83±2.17b	236.00±12.15b	36.96±1.96b	52.70±3.22a	341.66±19.84a	47.43±3.26a
	Si_0	47.97±2.71a	266.20±16.37a	38.87±2.28a	39.11±2.57b	267.23±17.30b	34.75±2.27b
平均 Average		41.23B	245.55C	36.92A	41.79C	284.26C	39.05A
$P_{0.1}$	$Si_{1.5}$	57.98±3.42a	553.60±44.46c	26.45±1.43c	53.57±1.89b	1 056.05±70.16c	32.85±1.08b
	$Si_{0.75}$	52.41±2.27c	642.35±30.39b	33.68±1.46a	59.15±1.14a	1 288.38±104.76b	34.61±0.66a
	Si_0	54.89±2.56b	889.14±48.51a	32.77±1.50b	53.77±2.74b	1 621.22±73.70a	32.51±1.44b
平均 Average		55.09A	695.03B	30.97C	55.50B	1 321.88B	33.32B
$P_{0.01}$	$Si_{1.5}$	53.07±2.53b	915.04±48.39b	33.68±1.53b	57.00±3.20b	1 410.71±88.65c	31.72±1.68a
	$Si_{0.75}$	52.30±3.37b	880.90±46.54c	34.92±2.08a	60.91±2.93a	1 629.74±96.64a	32.16±1.50a
	Si_0	54.30±3.07a	1 136.68±59.95a	34.86±1.94a	56.47±3.39b	1 488.26±40.70b	32.37±1.53a
平均 Average		53.22A	977.54A	34.49B	58.12A	1 509.57A	32.09B
F 值 *F* value	V	160.37^{**}	971.69^{**}	17.79^{ns}			
	P	$1\,232.51^{**}$	$1\,972.97^{**}$	170.34^{**}			
	Si	114.42^{**}	414.77^{**}	166.98^{**}			
	V × P	30.80^{**}	188.44^{**}	31.93^{**}			
	V × Si	318.04^{**}	74.03^{**}	67.94^{**}			
	P × Si	91.63^{**}	161.66^{**}	40.63^{**}			
	V × P × Si	53.87^{**}	53.45^{**}	75.44^{**}			

NDMP: 氮素干物质生产率; PDMP: 磷素干物质生产率; KDMP: 钾素干物质生产率。$P_{1.0}$: 培养液纯磷浓度为 1.0 mmol·L^{-1}; $P_{0.1}$: 培养液纯磷浓度为 0.1 mmol·L^{-1}; $P_{0.01}$: 培养液纯磷浓度为 0.01 mmol·L^{-1}。$S_{1.5}$: 培养液纯硅浓度为 1.5 mmol·L^{-1}; $S_{0.75}$: 培养液纯硅浓度为 0.75 mmol·L^{-1}; S_0: 培养液中无硅。同列不同小写字母表示相同磷浓度下不同硅浓度间差异达 5%显著水平, 同列不同大写字母表示不同磷浓度间差异达 5%显著水平; *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。NDMP: N dry matter productivity; PDMP: P dry matter productivity; KDMP: K dry matter productivity. $P_{1.0}$, $P_{0.1}$ and $P_{0.01}$ mean that the P concentrations of culture media are 1.0 mmol·L^{-1}, 0.1 mmol·L^{-1} and 0.01 mmol·L^{-1}, respectively. $Si_{1.5}$, $Si_{0.75}$ and Si_0 mean that the Si concentrations of the culture media of 1.5 mmol·L^{-1}, 0.75 mmol·L^{-1} and 0 mmol·L^{-1}, respectively. Different lowercase letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different Si concentrations for the same P concentration. Different capital letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among different P concentrations. * and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.5　玉米苗期生长与氮磷钾积累的相关分析

从表 7 得出，两个品种平均，玉米苗期根系、茎鞘、叶片和全株干物质积累量彼此呈极显著正相关；干物质积累与叶面积呈极显著正相关，与根冠比呈极显著负相关。根系各指标间呈显著正相关，与干物质和叶面积呈极显著正相关。氮、磷、钾积累总量间彼此呈极显著正相关，与干物质、根系各指标间彼此呈显著正相关；氮、磷、钾积累量与根系氮、磷、钾分配率间互呈显著负相关。NDMP 和 PDMP 间呈显著正相关，PDMP 与 KDMP 间呈显著负相关；NDMP 和 PDMP 与干物质积累、根系各指标及氮、磷、钾积累间彼此呈显著负相关，KDMP 则反之。可见，良好的根系构建能够促进氮、磷、钾的吸收和干物质积累；氮、磷、钾的积累间相互促进，其协同效应也能促进玉米根系和地上部的生长。根系形态、干物质和氮、磷、钾积累等因素构成一个交互作用网络，通过硅磷配施改善根系形态，促进根系生长和氮、磷、钾积累来影响玉米植株的干物质积累和叶面积、物质生产效率等，以达到促进玉米生长的作用。

表 7　玉米苗期干物质积累、根系形态、氮磷钾积累与分配和氮磷钾物质生产效率间的相关性

Table 7　Correlations of dry matter, NPK uptake and distribution, dry matter productivity of NPK and root indicators of maize at seedling stage

指标 Index	RDMA	SDMA	LDMA	TDMA	R/T	LA	TRL	RS	RV	TPA	RPDR	TNA	RNDR	TKA	RKDR	NDMP	PDMP	KDMP
RDMA	—	0.58**	0.60**	0.68**	0.07	0.65**	0.41**	0.57**	0.50**	0.60**	−0.12	0.63**	−0.28*	0.64**	−0.27*	−0.47**	−0.44**	0.33*
SDMA	—	—	0.92**	0.95**	−0.67**	0.75**	0.44**	0.63**	0.75**	0.92**	−0.63**	0.94**	−0.47**	0.91**	−0.53**	−0.74**	−0.66**	0.29*
LDMA	—	—	—	0.99**	−0.73**	0.81**	0.49**	0.66**	0.69**	0.92**	−0.58**	0.97**	−0.58**	0.95**	−0.67**	−0.74**	−0.58**	0.34*
TDMA	—	—	—	—	−0.65**	0.82**	0.50**	0.68**	0.72**	0.93**	−0.56**	0.98**	−0.55**	0.96**	−0.63**	−0.75**	−0.62**	0.35**
R/T	—	—	—	—	—	−0.50**	−0.26	−0.32*	−0.38**	−0.65**	0.71**	−0.66**	0.43**	−0.63**	0.55**	0.52**	0.45**	−0.22
LA	—	—	—	—	—	—	0.41**	0.55**	0.54**	0.82**	−0.54**	0.81**	−0.36**	0.77**	−0.49**	−0.77**	−0.70**	0.28*
TRL	—	—	—	—	—	—	—	0.80**	0.53**	0.47**	−0.28*	0.51**	−0.52**	0.58**	−0.61**	−0.33*	−0.35**	0.05
RS	—	—	—	—	—	—	—	—	0.80**	0.64**	−0.29*	0.69**	−0.46**	0.71**	−0.60**	−0.44**	−0.43**	0.23
RV	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.74**	−0.44**	0.74**	−0.37**	0.69**	−0.44**	−0.60**	−0.55**	0.23
TPA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	−0.71**	0.97**	−0.42**	0.87**	−0.45**	−0.84**	−0.79**	0.45**
RPDR	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	−0.63**	0.16	−0.52**	0.26	0.66**	0.85**	−0.33*
TNA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	−0.55**	0.94**	−0.59**	−0.82**	−0.67**	0.36**
RNDR	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	−0.53**	0.76**	0.35**	0.01	−0.19
TKA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	−0.68**	−0.69**	−0.56**	0.16
RKDR	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.29*	0.10	−0.04
NDMP	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.75**	−0.17
PDMP	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	−0.38**
KDMP	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

RDMA：根系干物质积累量；SDMA：茎鞘干物质积累量；LDMA：叶片干物质积累量；TDMA：干物质积累总量；R/T：根冠比；LA：叶面积；TRL：单株总根长；RS：根表面积；RV：根体积；TPA：磷积累总量；RPDR：根系磷分配率；TNA：氮积累总量；RNDR：根系氮分配率；TKA：钾积累总量；RKDR：根系钾分配率；NDMP：氮素干物质生产率；PDMP：磷素干物质生产率；KDMP：钾素干物质生产率。RDMA: root dry matter accumulation amount; SDMA: stem-sheath dry matter accumulation amount; LDMA: leaf dry matter accumulation amount; TDMA: total dry matter accumulation amount; R/T: root-shoot ratio; LA: leaf area; TRL: total root length; RS: root surface area; RV: root volume; TPA: phosphorus accumulation amount; RPDR: root phosphorus distribution rate; TNA: nitrogen accumulation amount; RNDR: root nitrogen distribution rate; TKA: potassium accumulation amount; RKDR: root potassium distribution rate; NDMP: nitrogen dry matter productivity; PDMP: phosphorus dry matter productivity; KDMP: potassium dry matter productivity.

3　讨论

根系是重要的吸收和合成器官，更是植物最先感受并传导养分胁迫信号的部位，根系生长发育良好是玉米苗期乃至整个生育期吸收水分和养分的保障。外界养分充足与否会直接影响着玉米根系能否正常生长，而植物经历缺素逆境时会有一套自己的适应机制，例如改变根系形态、提高根系活力、合成和分泌某些特殊物质、增加部分代谢酶活性，以提高植物在缺磷环境中对磷素的吸收和利用[13,25-26]。本研究结果表明，缺磷会抑制玉米苗根系生长发育，降低单株总根长、根体积和表面积，从而降低玉米单株氮、磷、钾积累量，进而影响地上部生长，降低玉米苗的叶面积和干物质积累量，此结果与前人的研究结果基本一致。本试验还表明，玉米苗可通过改变氮磷钾和干物质在地上和地下部的分配率来适应磷营养的变化，低磷胁迫可在一定程度上提

高氮、磷、钾和干物质(特别是磷)在根系中的分配率，以增强根系的吸收能力。植物耐低磷能力存在基因型差异[25]。杨永等[24]通过水盆试验认为‘正红 2 号’为较耐低磷品种，‘正红 115’为低磷敏感品种。在本试验中，低磷胁迫对‘正红 115’根系生长的影响(根长、根表面积和体积降低的幅度)大于‘正红 2 号’，低磷条件下磷积累量的降低幅度也较‘正红 2 号’高，但氮、钾和干物质积累量的降幅与‘正红 2 号’的差异相对较小，这可能与试验条件不同有关(本试验为砂盆，磷浓度更高)；另外在本试验条件下发现‘正红 115’在低磷处理中磷在根系中的分配率提高幅度远大于‘正红 2 号’，这可能是其适应低磷胁迫的重要机制。

硅在植物生长发育过程中发挥重要作用，比如提高抗倒伏[19]、抗重金属镉[27]、抗病虫[28]、提高光合能力[29]等。玉米是喜硅植物，会吸收并积累大量硅。施硅能改善玉米光合能力[30]，提高玉米水分利用效率[29]，增加耐低磷能力[21]，提高氮、磷、钾积累量[16,31]，提高叶片钾含量和玉米产量[17-20]。本研究结果表明，在正常磷条件下，增加硅能显著促进玉米幼苗根系的生长，增加根长、根体积和表面积，提高植株磷的吸收积累量，并促进其向叶片分配，而磷吸收积累量的增加，又促进了氮和钾吸收积累量的增加，从而促进了地上部的生长，增大叶面积，增加干物质积累，硅和磷表现出明显的协同作用和配合效应；在中度缺磷条件下施硅也有较好的促进磷吸收，进而促氮、钾吸收和幼苗生长的效果，表明硅可在一定程度上缓解玉米的低磷胁迫；但在严重缺磷时硅对玉米氮、磷和钾的吸收积累和干物质生产无显著改善，表明硅与磷之间不存在替代效应，只有协同作用，生产上应考虑磷肥和硅肥配合施用。有研究证明硅能增强植物通气组织，促进根氧输送以减少铁、锰吸收，提高铁/锰比而增强磷活性[32]，这可能是硅促进玉米磷素吸收的机制之一，不过有关硅磷互促和协同作用的机理还有待进一步研究。

4 结论

低磷会抑制玉米幼苗根系的生长，降低根长、根体积和表面积，减少磷素吸收积累量，并同时减少氮和钾的吸收积累，进而影响地上部生长，降低叶面积和干物质积累；低磷对玉米幼苗根系生长的影响程度小于地上部，导致根冠比升高，根中磷素分配率和氮、磷、钾的干物质生产效率提高，这是其适应低磷胁迫的重要机制。不同品种受低磷胁迫影响的程度也有差异，在参试的两个品种中，‘正红 115’根系生长和磷积累量受影响的程度大于‘正红 2 号’，但‘正红 115’通过大幅度提高磷在根中的分配率来适应低磷环境。

硅可在一定程度上促进玉米幼苗的生长，增加根长、根体积、表面积和叶面积，提高磷吸收积累量，并进一步增加氮和钾的吸收积累和干物质生产，缓解低磷的胁迫作用，不过这种效应随磷浓度的降低而减弱，即硅和磷之间存在明显的协同作用和配合效应，生产上磷和硅应配合施用。

参考文献 References

[1] 陈庆瑞, 冯文强, 涂仕华, 等. 四川盆中丘陵区不同台位旱坡地土壤养分状况研究[J]. 西南农业学报, 2002, 15(1): 74–78
Chen Q R, Feng W Q, Tu S H, et al. Study on nutrient status in sloping uplands of Sichuan hilly areas[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2002, 15(1): 74–78

[2] 许宗林, 苟曦, 李昆, 等. 四川省耕地土壤养分分布特征与动态变化趋势探讨[J]. 西南农业学报, 2008, 21(3): 718–723
Xu Z L, Gou X, Li K, et al. Distribution and characteristics of cultivated soil nutrients and its dynamic change trend in Sichuan Province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(3): 718–723

[3] 易玉林. 河南省土壤养分状况研究[J]. 河南科学, 2012, 30(7): 882–886
Yi Y L. Soil nutrients status in Henan Province[J]. Henan Science, 2012, 30(7): 882–886

[4] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924

[5] Vance C P, Uhde-Stone C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. New Phytologist, 2003, 157(3): 423–447

[6] 彭正萍, 张家铜, 袁硕, 等. 不同供磷水平对玉米干物质和磷动态积累及分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 793–798
Peng Z P, Zhang J T, Yuan S, et al. Effects of different phosphorus application rates on the dynamic accumulation and distribution of dry matter and phosphorus in maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(4): 793–798

[7] 于兆国, 张淑香. 不同磷效率玉米自交系根系形态与根际特征的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1227–1231
Yu Z G, Zhang S X. Root configuration and rhizosphere characteristics of different maize inbred lines with contrasting P efficiency[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(6): 1227–1231

[8] 陈俊意, 蔡一林, 徐莉, 等. 低磷胁迫对玉米叶片色素和形

态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 129–133
Chen J Y, Cai Y L, Xu L, et al. Effect of phosphorus stress on the pigment and morphology of different maize genotypes[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 129–133
[9] 李绍长, 胡昌浩, 龚江, 等. 供磷水平对不同磷效率玉米氮、钾素吸收和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 237–240
Li S C, Hu C H, Gong J, et al. Effects of phosphorus supply on nitrogen and potassium absorption and distribution of maize with different phosphorus efficiency[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 237–240
[10] 章爱群, 贺立源, 门玉英, 等. 磷水平对不同耐低磷玉米基因型幼苗生长和养分吸收的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(3): 347–350
Zhang A Q, He L Y, Men Y Y, et al. Effect of phosphorus levels on growth and nutrient absorption of low-P tolerant maize seedlings[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2008, 14(3): 347–350
[11] 袁硕, 李春俭, 彭正萍, 等. 磷对不同玉米品种生长、体内磷循环和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 310–316
Yuan S, Li C J, Peng Z P, et al. Effects of phosphorus on the plant growth, phosphorus cycling and distribution in different maize cultivars[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 310–316
[12] 张可炜, 李坤朋, 刘治刚, 等. 磷水平对不同基因型玉米苗期磷吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 795–801
Zhang K W, Li K P, Liu Z G, et al. Effect of phosphorus level on phosphorus absorption and utilization of different genotype maize seedlings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(5): 795–801
[13] 张丽梅, 郭再华, 张琳, 等. 缺磷对不同耐低磷玉米基因型酸性磷酸酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 898–910
Zhang L M, Guo Z H, Zhang L, et al. Effects of phosphate deficiency on acid phosphatase activities of different maize genotypes tolerant to low-p stress[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(4): 898–910
[14] 李晓艳, 孙立, 吴良欢. 不同吸硅型植物各器官硅素及氮、磷、钾素分布特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 193–198
Li X Y, Sun L, Wu L H. The distribution of silicon, nitrogen, phosphorus and potassium in the organs of different silicon-absorbing plants[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(1): 193–198
[15] 肖千明, 马兴全, 娄春荣, 等. 玉米硅的阶段营养与土壤有效硅关系研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(4): 42–45
Xiao Q M, Ma X Q, Lou C R, et al. The relationship between phasic nutrition of maize and available silicon in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(4): 42–45
[16] 刘慧霞, 郭正刚. 不同土壤水分条件下添加硅对紫花苜蓿茎叶和土壤氮磷钾含量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(6): 809–813
Liu H X, Guo Z G. Effects of supplementary silicon on nitrogen, phosphorus and potassium contents in the shoots of *Medicago sativa* plants and in the soil under different soil moisture conditions[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17(6): 809–813
[17] 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 等. 不同时期施硅对超级稻产量和硅素吸收、利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1475–1488
Gong J L, Hu Y J, Long H Y, et al. Effect of application of silicon at different periods on grain yield and silicon absorption, use efficiency in super rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1475–1488
[18] 陆福勇, 江立庚, 秦华东, 等. 不同氮、硅用量对水稻产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 846–850
Lu F Y, Jiang L G, Qin H D, et al. Effects of nitrogen and silicon levels on grain yield and qualities of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(6): 846–850
[19] 张月玲, 王宜伦, 谭金芳, 等. 氮硅配施对夏玉米抗倒性和产量的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(4): 122–125
Zhang Y L, Wang Y L, Tan J F, et al. Effect of nitrogen application combined with silicon on the lodging-resistance and the yield of summer corn[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(4): 122–125
[20] 周青, 潘国庆, 施作家, 等. 玉米施用硅肥的增产效果及其对群体质量的影响[J]. 玉米科学, 2002, 10(1): 81–83
Zhou Q, Pan G Q, Shi Z J, et al. Increasing production efficiency of using Si and the influence on quality of population in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2002, 10(1): 81–83
[21] Yang Y, Li J W, Shi H C, et al. Alleviation of silicon on low-P stressed maize (*Zea may* L.) seedlings under hydroponic culture conditions[J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2008, 4(2): 168–172
[22] 李仁英, 邱译萱, 刘春艳, 等. 硅对水稻土磷吸附-解吸行为的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(5): 1134–1139
Li R Y, Qiu Y X, Liu C Y, et al. Adsorption-desorption behaviors of phosphorus under different silicon concentrations in paddy soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(5): 1134–1139
[23] 王东, 王晓岑, 李淑芹, 等. 硅磷交互作用对土壤酶活力的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(3): 70–74
Wang D, Wang X C, Li S Q, et al. Effects of silicon-phosphorus interactions on soil enzyme activities[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(3): 70–74
[24] 杨永, 石海春, 柯永培, 等. 几个玉米自交系和杂交种耐低磷能力的研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(5): 12–16
Yang Y, Shi H C, Ke Y P, et al. Study on the ability of low phosphorus tolerance of some maize inbred lines and hybrids[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(5): 12–16
[25] 张丽梅, 贺立源, 李建生, 等. 不同耐低磷基因型玉米磷营养特性研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 110–115
Zhang L M, He L Y, Li J S, et al. Phosphorus nutrient characteristics of different maize inbreds with tolerance to low-P stress[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(1): 110–115
[26] 米国华, 邢建平, 陈范骏, 等. 玉米苗期根系生长与耐低磷的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 468–472

Mi G H, Xing J P, Chen F J, et al. Maize root growth in relation to tolerance to low phosphorus[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(5): 468–472
[27] 徐应星, 李军. 硅和磷配合施入对镉污染土壤的修复改良[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 340–343
Xu Y X, Li J. Silicon and phosphorus-mediated improve soil contaminated by cadmium[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 340–343
[28] 葛少彬, 刘敏, 蔡昆争, 等. 硅介导稻瘟病抗性的生理机理[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 240–251
Ge S B, Liu M, Cai K Z, et al. Physiological mechanism of silicon-enhanced rice blast resistance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(2): 240–241
[29] 李清芳, 马成仓, 尚启亮. 干旱胁迫下硅对玉米光合作用和保护酶的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 531–536
Li Q F, Ma C C, Shang Q L. Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 531–536
[30] 朱从桦, 张嘉莉, 王兴龙, 等. 硅磷配施对低磷土壤春玉米干物质积累、分配及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 725–735
Zhu C H, Zhang J L, Wang X L, et al. Effects of combined application of silicon and phosphorus fertilizers on dry matter accumulation and distribution and grain yield of spring maize in low phosphorus soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 725–735
[31] 朱从桦, 谢孟林, 郭萍, 等. 硅、磷配施对玉米氮钾养分吸收利用的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1489–1496
Zhu C H, Xie M L, Guo P, et al. Effects of phosphorus and silicon application on uptake and utilization of N, K by maize[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(6): 1489–1496
[32] 黄秋婵, 韦友欢, 韦良兴. 硅对水稻生长的影响及其增产机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(3): 919–920
Huang Q C, Wei Y H, Wei L X. Review of the effect of the silicon on growth and mechanism of rice yield-increasing[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(3): 919–920